

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไฮโดรโปนิกส์

ไฮโดรโปนิกส์ หมายถึง เทคนิคการปลูกพืชด้วยน้ำ พืชจะเจริญเติบโตด้วยสารละลายธาตุอาหารที่เติมลงไปใต้น้ำ และไหลเวียนผ่านรากพืชตลอดเวลา (Umrao, 2008)

2.1.1 ระบบการให้สารละลายธาตุอาหารของการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์

ระบบการให้สารละลายธาตุอาหารเป็นแบบระบบปิด (Closed system) ซึ่งเป็นวิธีการที่ให้สารละลายผ่านรากพืชแล้วระบายลงสู่ถังหรือภาชนะที่บรรจุ และมีการหมุนเวียนโดยใช้ปั๊มนำสารละลายธาตุอาหารกลับขึ้นมาให้แก่พืชอีกครั้งอย่างต่อเนื่อง ได้แก่ รูปแบบ Dynamic Root Floating Technique (DRFT) Nutrient Film Technique (NFT) Nutrient Flow Technique (NFLT) Deep Flow Technique (DFT) และ Flood and Drain (FAD) ตามลำดับ (ดิเรก, 2547)

2.1.2 รูปแบบระบบปิดของการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิกส์

รูปแบบของไฮโดรโปนิกส์ในระบบปิดแบ่งออกเป็น 5 แบบ ดังนี้ (ดิเรก, 2547; ราชนนทร์และคณะ, 2548)

1. Dynamic Root Floating Technique (DRFT) เป็นเทคนิคให้รากพืชแช่อยู่ในน้ำ ส่วนหนึ่งและอีกส่วนหนึ่งสร้างรากอากาศ เพื่อช่วยในการหายใจ โดยจะทำให้พืชสามารถเจริญได้ในอุณหภูมิของสารละลายที่สูงกว่าระบบอื่น ๆ ระบบที่รับน้ำในกระบะที่ช่วยให้ระดับน้ำสูงขึ้นหรือลดลงได้ตามความต้องการของพืช กำหนดให้ระดับน้ำปล่อยให้รากจมอยู่ในน้ำลึกในกระบะแรก แล้วค่อยลดระดับน้ำลงจากระดับแรกที่สูงประมาณ 8 cm เหลือน้ำที่รากพืชแช่อยู่ประมาณ 4 cm จากนั้นน้ำไหลลงสู่ถังสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีปริมาณมากกว่าถาดปลูกโดยใช้ปั๊มน้ำซึ่งจะสูบส่งขึ้นไปยังรางปลูกอีกครั้งและหมุนเวียนเป็นระยะ ๆ

2. Nutrient Film Technique (NFT) เป็นเทคนิคการให้สารละลายไหลผ่านรากพืชเป็นแผ่นบางๆ ให้รากแช่อยู่ในสารละลายโดยตรง สารละลายจะไหลผ่านรากพืชเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ ตามความลาดเอียงของรางปลูกน้ำที่ไหลผ่านมีความหนาประมาณ 2-3 mm สารละลายจะไหลหมุนเวียนผ่านรากตลอดเวลา ระบบนี้สามารถแบ่งได้เป็นการปลูกในราง ในร่อง และในท่อ

3. Nutrient Flow Technique (NFLT) เป็นเทคนิคให้พืชลอยในน้ำที่คืนไหลช้าอย่างสม่ำเสมอบนรางปลูกอย่างต่อเนื่องที่ระดับความลึกประมาณ 10-15 mm

4. Deep Flow Technique (DFT) เป็นระบบที่รากพืชแช่อยู่ในสารละลายลึกประมาณ 15-20 cm โดยมีการปลูกพืชบนแผ่นโฟม หรือวัสดุที่ลอยน้ำได้เพื่อยึดลำต้น แต่จะปล่อยให้รากเป็นอิสระในน้ำ ระบบนี้ไม่มีความลาดเอียง มีการหมุนเวียนสารละลายโดยการใช้ปั๊มดูดสารละลายจากถังพักขึ้นมาใช้ใหม่ในระบบ เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนเพื่อเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้กับระบบน้ำที่ใช้ในการผลิตผัก

5. Flood and Drain (FAD) เป็นเทคนิคการปลูกพืชให้สารละลายธาตุอาหารท่วมราก และภาชนะปลูกระยะหนึ่งแล้วค่อยๆ ระบายออก เมื่อได้ระยะหนึ่งจึงให้สารละลายธาตุอีกครั้ง

ปัจจุบันรูปแบบการปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์ในประเทศไทยที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางได้แก่ DRFT และ NFT ซึ่ง DRFT เป็นรูปแบบที่ง่ายในการจัดการ (อิทธิสุนทร, 2550) เนื่องจากเป็นระบบปิด เป็นระบบที่ต้องการในอนาคตเพื่อการปลูกพืชอย่างยั่งยืนเพราะมีการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างประหยัด (ธรรมศักดิ์, 2550)

2.2 ปัญหาในการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์

ปัญหาสำคัญที่มักพบในปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ได้แก่ การขาดสมดุลของธาตุอาหาร การสะสมจุลินทรีย์สาเหตุเชื้อโรคพืช และการสะสมสารอินทรีย์ในสารละลายธาตุอาหารจากการปลูก หากมีการระบายสู่สิ่งแวดล้อมก็จะก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมดังหลายสาเหตุต่อไปนี้

2.2.1 การขาดสมดุลของสารละลายธาตุอาหาร

ในการปลูกพืชด้วยระบบปิดสารละลายธาตุอาหารไหลผ่านรากพืช รากพืชจะดูดธาตุอาหารที่ต้องการมาก และเหลือสิ่งที่พืชไม่ต้องการ ทำให้เกิดความไม่สมดุลของธาตุอาหาร เช่น โซเดียม ซึ่งพืชไม่มีการดูดไปใช้ จึงเหลือโซเดียมสะสมอยู่ใน ทำให้ปริมาณโซเดียมเพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่เป็นพิษต่อพืชหรือความไม่สมดุลของแคลเซียม แมกนีเซียม และโพแทสเซียม เช่น หากมีปริมาณแมกนีเซียม หรือโพแทสเซียม มากเกินไปจะทำให้พืชใช้แคลเซียมได้น้อยลงจนถึงระดับความเป็นพิษทำให้พืชเกิดอาการใบไหม้ในผักสลัด จึงต้องถ่ายสารละลายธาตุอาหารในระบบทิ้ง (อิทธิสุนทร, 2548)

2.2.2 การสะสมเชื้อโรคพืชในระบบ

การระบาดของโรคพืชเกิดจากหมุนเวียนสารละลายกลับมาใช้ (ธรรมศักดิ์, 2550) เนื่องจากฤดูร้อนในประเทศไทย มีความแตกต่างของอุณหภูมิ ทำให้สารละลายธาตุอาหารมีอุณหภูมิสูง (ดิเรก, 2547) ทำให้เชื้อโรคเข้าทำลายรากพืชได้รับความเสียหายง่าย (อรรถพร, 2551) โรคพืชที่สะสมในระบบ เช่น เชื้อรา *Pythium* spp. สาเหตุโรครากเน่า (อิทธิสุนทร, 2548;

Chatterton *et al.*, 2004; Hultberg *et al.*, 2008; อรรถพร, 2551) เชื้อรา *Phytophthora cryptogea* สาเหตุโรคโคนเน่า (Stanghellini *et al.*, 1996; Jonghe *et al.*, 2005; Hultberg *et al.*, 2008) และ เชื้อรา *Fusarium oxysporum* สาเหตุโรคเหี่ยว (ดิเรก, 2547; Hultberg *et al.*, 2008) จึงต้องถ่าย สารละลายธาตุอาหารในระบบบึง (อิทธิสุนทร, 2548)

2.2.3 การสะสมของสารอินทรีย์ที่เป็นพิษในสารละลายธาตุอาหาร

เกิดจากรากพืชปล่อยของเสียออกมา เช่น กรดวานิลลิก ในผักกาดหอมใบหรือ จุลินทรีย์ ที่อยู่ในสารละลายธาตุอาหารสร้างสารอินทรีย์ขึ้นมา สารอินทรีย์เหล่านี้จะสร้างสารยับยั้ง การเจริญเติบโต จนทำให้เป็นอันตรายต่อพืช จึงต้องถ่ายสารละลายธาตุอาหารในระบบบึง (ธรรมศักดิ์, 2550; อิทธิสุนทร, 2548)

ด้วยสาเหตุดังกล่าวข้างต้นจึงมีความจำเป็นต้องถ่ายสารละลายธาตุอาหารในระบบ ออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งยังคงมีธาตุอาหารตกค้างร้อยละ 50 (ดิเรก, 2550) ส่วนมากเป็นปุ๋ย ไนโตรเจน-ไนโตรเจน (ขงยุทธ, 2551) โปแทสเซียม (มัญญ, 2544) และฟอสฟอรัส (Hu *et al.*, 2008) เป็นหลัก จากสูตรสารละลายธาตุอาหารของ Hoagland ซึ่งมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสฟอรัส ทั้งหมด ไนโตรเจน-ไนโตรเจน และแอมโมเนียม-ไนโตรเจน เท่ากับ 210.15 30.97 196.14 และ 14.01 mg/L ตามลำดับ (Hu *et al.*, 2008) เมื่อถ่ายออกสู่สิ่งแวดล้อมทำให้สารละลายธาตุอาหารไหล ไปสู่ดินและแหล่งน้ำ (นภดล, 2550) เมื่อแหล่งน้ำได้รับสารละลายธาตุอาหารในปริมาณที่สูง จึง เป็นปัญหาสำคัญที่ก่อให้เกิดมลพิษในแหล่งน้ำเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Eutrophication หรือ Algae bloom (Smith *et al.*, 1999; Bushaw and Sellner, 1999; Shukla *et al.*, 2008) ซึ่งเกิด จากแหล่งน้ำได้รับความเข้มข้นของธาตุอาหารในปริมาณที่มากเกินไป ทำให้สาหร่ายหรือพืชน้ำมี การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว (Bushaw and Sellner, 1999; Shukla *et al.*, 2008) สาหร่ายหรือพืชน้ำ เหล่านี้มีความหนาแน่นในบริเวณผิวน้ำมากเกินไป ซึ่งจะบังแสงแดดและทำให้ปริมาณ ออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลง ส่งผลเสียต่อสิ่งมีชีวิตที่ใช้ออกซิเจนในเวลากลางคืนได้รับออกซิเจน ไม่เพียงพอต่อการดำรงชีวิต ทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำตายได้ เมื่อความเข้มข้นธาตุอาหารลดน้อยลงทำ ให้สาหร่ายหรือพืชน้ำตาย จึงเกิดการเน่าเสียของแหล่งน้ำซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของปรากฏการณ์โลก ร้อน (Hu *et al.*, 2008)

2.3 แนวทางการแก้ไขปัญหาคาการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์เพื่อเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

2.3.1 การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้สารละลายธาตุอาหาร

การปรับสภาพสารละลายธาตุอาหารที่เหลือในระบบโดยใช้สารเสริมประสิทธิภาพ (Adjuvant) ที่มีสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิว (Surfactants) ช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำสามารถจัดเรียงโมเลกุลเป็นชั้นเดี่ยว ทำให้สารละลายธาตุอาหารกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้น (ยงยุทธ, 2543; Swietlik and Faust, 1984) อีกทั้งเป็นสารบัฟเฟอร์ ช่วยปรับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายธาตุอาหาร พืชจึงสามารถนำธาตุอาหารไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ยงยุทธ, 2543) สารละลายธาตุอาหารในระบบปิดที่ใช้ปลูกพืชแล้วสามารถนำกลับมาปลูกพืชได้อีกครั้ง (อิทธิสุนทร, 2548)

สมบัติของสารเสริมประสิทธิภาพ

1. สารบัฟเฟอร์ (Buffer agent) สามารถปรับสภาพน้ำที่มีความเป็นกรด-ด่าง ให้ใช้ร่วมกับสารละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Mcwhorter, 1985)
2. อิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifiers) เป็นการทำให้สารที่อยู่ในรูปสารเข้มข้นมีน้ำมันเป็นองค์ประกอบสามารถเกิดการกระจายตัวในน้ำได้ดี ไม่แยกตัวของสารกับน้ำ (Tu *et al.*, 2001)
3. การกระจายตัว (Spreaders) ทำให้สารออกฤทธิ์สามารถกระจายตัวครอบคลุมทั่วผิวใบพืชในการฉีดพ่นทำให้สารแทรกซึมเข้าสู่พืชอย่างมีประสิทธิภาพ (Miller and Westra, 1998)
4. ป้องกันการตกตะกอน (Dispersant) ทำให้สารออกฤทธิ์สามารถกระจายในน้ำตัวอย่างสม่ำเสมอ (ยงยุทธ, 2543)

ประเภทของสารเสริมประสิทธิภาพ (Hess, 1999; Tu *et al.*, 2001)

1. น้ำมัน (Oil adjuvants) ได้แก่ น้ำมันปิโตรเลียมเข้มข้น น้ำมันพืช และ ฮิวเมคแตนต์ (Humectant)
2. สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เป็นสารประกอบอินทรีย์ประกอบด้วยสองส่วนที่สำคัญคือ ส่วนหัวเป็นโมเลกุลมีขั้วที่สามารถละลายน้ำได้ (Hydrophilic) และส่วนหางที่ไม่มีขั้วเป็นพวกที่ไม่ละลายน้ำ (Hydrophobic) (Boonchan *et al.*, 1998)

สารลดแรงตึงผิว แบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม (สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, 2524) ได้แก่

1. สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactant) ส่วนของโมเลกุลที่ละลายน้ำ มีประจุลบ ทำหน้าที่เป็นด่างที่สะเทิน (Neutralize) ทำให้กลไกในการทำ ความสะอาดเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ได้แก่ สบู่ (Soap, R-COO⁻), แอลคิลซัลเฟต (Alkyl sulphates, R-O-SO₃⁻) และ แอลคิลอีเธอร์ซัลเฟต (Alkyl ether sulphates, R-(OC₂H₄)_n-O-SO₃⁻)
2. สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ (Amphoteric) ส่วนของโมเลกุลที่ละลายน้ำ อาจเป็นได้ทั้งประจุบวกหรือลบขึ้นอยู่กับความเป็นกรดเป็นด่าง เช่น แอลคิลบีเทน (Alkyl betain, R-N⁺-CH₂-COO⁻ (CH₃)₂)
3. สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant) ส่วนของโมเลกุลที่ละลายน้ำมีประจุบวก ได้แก่ เกลือของแอมมีน เช่น แอลคิลไตรเมทิลแอมมोनียมเฮไลด์ (Alkyl trimethyl ammonium halides, R-N⁺(CH₃)₃)
4. สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant) ส่วนของโมเลกุลที่ละลายน้ำไม่มีประจุ แต่ก็สามารถดึงดูดกับน้ำทำให้ละลายได้ เช่น แอลกอฮอล์ เอธิกซิลเลต (Alcohol ethoxylates, R-(O C₂H₄)_n-OH)

กลไกการทำงานของสารเสริมประสิทธิภาพ

สารเสริมประสิทธิภาพส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสารลดแรงตึงผิว (Miller and Westra, 1998) และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ นิยมใช้กันมากที่สุดเพราะมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาสารละลายธาตุอาหารได้มากและเนื่องจากไม่มีความเป็นพิษ (Tu *et al.*, 2001) เมื่อเติมสารเสริมประสิทธิภาพในระบบ สารลดแรงตึงผิวจะไปเกาะจับกับสารละลายธาตุอาหาร เกิดการกระจายตัว และเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมากกว่าความเข้มข้นวิกฤติของการเกิดไมเซลล์ (Critical Micelle Concentration, CMC) จะเกิดเป็นไมเซลล์ขึ้นพร้อมทั้งทำให้สารที่ตกตะกอนเกิดการละลายน้ำมากยิ่งขึ้นในสารละลาย (Edwards *et al.*, 1991; Laha and Luthy, 1991; Bury and Miller, 1993)

การนำสารเสริมประสิทธิภาพมาประยุกต์ใช้

ตัวอย่างสารเสริมประสิทธิภาพ ได้แก่ Apsa-80[®] (All Purpose Spray Adjuvant Concentrate) ของบริษัท Amway ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงชนิดที่ไม่มีประจุ สลายแรงตึงผิวของน้ำทำให้มีการกระจายตัวของสารละลายธาตุอาหารอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ สำหรับ Apsa-80[®] มีองค์ประกอบทางเคมี คือ Alkyl aryl alkoxyolate ประกอบด้วย กรดไขมันอิสระร้อยละ 80 และสารประกอบอื่นๆอีกร้อยละ 20 ใช้กับพืชผักในอัตรา 2-3 mLต่อน้ำ 20 L (Amway, 2005) สัตย์จะ (2544) ได้ทดลองใช้ Apsa-80[®] ผสมกับสารปราบศัตรูพืชพบว่า การเพิ่มอัตราการกระจายตัวของสารเคมีสม่ำเสมอ โดยเฉพาะอัตราส่วน 7 mL/20 L มีประสิทธิภาพการปราบวัชพืชได้ดีขึ้น สมนึก

และคณะ (2541) ใช้สารสกัดจากสะเดาร่วมกับ Apsa-80[®] พบว่า สามารถลดปริมาณหนอนกินได้ผิวเปลือกลำต้นลงกองได้ดี Brumbaugh and Petersen (2001) ได้ทดลองใช้ Apsa-80[®] อัตราส่วน 540 mL/36 L เพื่อรดต้นข้าวโพดที่ปลูกร่วมกับดินร่วนปนทรายในพื้นที่ 1 ไร่ ภายในระยะเวลา 2 ปี พบว่า ผลผลิตและความยาวรากเพิ่มขึ้นร้อยละ 17 และ 28 ตามลำดับ

สำหรับ Tween-80[®] (Polyoxy ethylene (20) sorbitane monooleate) ของบริษัท Ajax finechem เป็นสารลดแรงตึงชนิดที่ไม่มีประจุ มีสูตรโมเลกุล C₆₄H₁₂₄O₂₇ สามารถเพิ่มการละลายของสารประกอบอินทรีย์กับไมเซลล์ในสารละลายได้ (Rosen, 1989) มีรายงานการใช้ Tween-80[®] ในการบำบัดน้ำมันในน้ำเสียได้ที่ 1 cmc (ชวลีกร, 2547) Zhou *et al.* (2007) ใช้ Tween-80[®] ความเข้มข้น 500 mg/L ร่วมกับราขาว (White rot fungi) พบว่า มีประสิทธิภาพในการสลาย Decabromodiphenylether (BDE-209) ที่เวลา 10 วัน ได้ร้อยละ 96.5 (w/w) Jayashree (2007) ใช้ Tween-80 ปริมาณ 0.1 g/L ร่วมกับ *Pseudomonas aeruginosa* เพื่อสลาย Endosulfan ที่ pH 8.5 ได้ถึงร้อยละ 94

2.3.2 การปลูกพืชที่เหมาะสมกับความต้องการธาตุอาหาร

การบำบัดสารละลายธาตุอาหารที่ตกค้างอยู่ในระบบปลูกโดยใช้พืชนั้นจะใช้พืชหลายชนิดที่ต้องการปุ๋ยในปริมาณแตกต่างกัน ซึ่งตรวจวัดโดยอาศัยหลักการค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity, EC) เนื่องจากสารละลายธาตุอาหารที่แตกตัวเป็นไอออนสามารถให้กระแสไฟฟ้าการวัดค่าการนำไฟฟ้าจะทำให้ทราบเพียงค่ารวมของการนำไฟฟ้าของสารละลายธาตุอาหารพืช (ราเชนทร์และคณะ, 2548) ดังนั้นจึงเรียงลำดับชนิดพืชที่ตอบสนองค่าการนำไฟฟ้าในปริมาณที่สูงกว่าไปยังพืชที่ตอบสนองค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำกว่า ซึ่งสามารถแบ่งชนิดพืชที่ต้องการใช้ค่าการนำไฟฟ้าเป็น 3 กลุ่ม คือ (มบุญ, 2544)

1. พืชที่ตอบสนองค่าการนำไฟฟ้าสูง อยู่ในช่วง 2.4-5.0 dS/m เช่น คะน้า มีค่า EC 3.5-4.5 dS/m และบัตือกโคลิมีค่า EC 3.0-3.5 dS/m
2. พืชที่ตอบสนองค่าการนำไฟฟ้าปานกลาง อยู่ในช่วง 1.5-2.4 dS/m เช่น ผักกาดฮ่องเต้ มีค่า EC 1.5-2.0 dS/m
3. พืชที่ตอบสนองค่าการนำไฟฟ้าต่ำ อยู่ในช่วงต่ำกว่า 1.5 dS/m เช่น ผักกาดหอม มีค่า EC 0.8-1.2 dS/m

ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงเลือกพืชในกลุ่มที่ตอบสนองค่าการนำไฟฟ้าที่สูงและต่ำมาบำบัดสารละลายธาตุอาหารที่ตกค้างอยู่ในระบบปลูก คือ คะน้าและผักกาดหอม

คะน้าจีน (Chinese kale) เป็นพืชล้มลุกตระกูลกะหล่ำ ใบสีเขียวเข้ม ลำต้นอวบ ชุ่มน้ำ (ระพีพรรณ, 2544) นิยมบริโภคส่วนของใบ และลำต้น สายพันธุ์ที่นิยมปลูกในประเทศไทยแบ่งได้ 3 พันธุ์ คือ พันธุ์ใบกลม, พันธุ์ใบแหลม และพันธุ์ก้าน (เมฆ, 2541)

คะน้าเห็ดหอม (*Brassica oleracea* var *albograbra* cv. KA 019) เป็นคะน้าจีนที่ได้รับการปรับปรุงสายพันธุ์ขึ้น มีลักษณะก้านอวบใหญ่ ใบมีรอยหยักเป็นรูปเห็ดหอม รสชาติดีกว่าคะน้าทั่วไป (สุกัญญา, มปป) และเป็นผักที่สำคัญนิยมปลูกมากในภาคใต้ มีพื้นที่ปลูก 19,805 ไร่ พื้นที่เก็บเกี่ยว 15,515 ไร่ ผลผลิต 15,724 ตันต่อปี และผลผลิตเฉลี่ย 1,013 กิโลกรัมต่อไร่ (ประวิตรและคณะ, 2545) การปลูกคะน้าแบบไฮโดรโปนิกส์ทำให้อายุการเก็บเกี่ยวสั้นและให้ผลผลิตสูงกว่าการปลูกในดิน (วิเชียรและคณะ, 2540) คะน้าตอบสนองค่า EC อยู่ระหว่าง 3.5-4.5 dS/m ค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 5.5-6.5 เหมาะกับการเจริญเติบโตและอายุการเก็บเกี่ยว 45-55 วันหลังย้ายปลูก (มนูญ, 2544) คุณค่าทางโภชนาการของคะน้าและปริมาณธาตุอาหารที่พบในใบพืช แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณค่าทางโภชนาการของคะน้าและผักกาดหอม ต่อน้ำหนัก 100 g และปริมาณธาตุอาหารที่พบในพืช (ระพีพรรณ, 2544; George Matelian Foundation, 2006; Barker and Pilbeam, 2007; พัชราภรณ์และคณะ, 2552; European Commission, 1997)

ชนิดพืช	คุณค่าทางโภชนาการ								
	Energy (cal)	Fat (g)	Carbo hydrate (g)	Fiber (g)	Protein (mg)	Niacin (mg)	B- carotein (g)	B-12 (mg)	C (mg)
คะน้า	35	0.40	6.80	1.20	300.00	0.40	0.01	0.13	93
ผักกาดหอม	15.68	1.81	2.65	3.80	324.80	0.20	0.22	0.11	26.88
ชนิดพืช	ปริมาณธาตุอาหารที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโต (% DW)								
	TKN	TP	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Cu	NO ₃ ⁻ (mg/Kg FW)
คะน้า	2.00-5.00	0.25-1.07	0.0030- 0.0042	0.10- 1.70	0.17- 1.08	0.010- 0.011	0.0026- 0.0035	0.0021	2,500
ผักกาดหอม	2.00-5.00	0.25-0.50	0.0025- 0.0054	0.10- 1.70	0.24- 3.50	0.01	0.0039- 0.0071	0.0011	3,000

ผักกาดหอม (Lettuce) อยู่ในวงศ์ Compositae มีถิ่นกำเนิดในยุโรปแถบทะเลเมดิเตอร์เรเนียน และเอเชียไมเนอร์ (อภิรักษ์, 2539; Yamaguchi, 1983) เป็นผักที่บริโภคใบแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ 1) ผักกาดหอมมีลักษณะเป็นหัว (Head lettuce) ซึ่งพบมากที่สุด ได้แก่ ไอซ์เบิร์ก (Iceberg) และบัตเตอร์เฮด (Butter head) 2) ผักกาดหอมชนิดใบ จะไม่มีการอัดตัวกันแน่นของใบ และ 3) ผักกาดหอมชนิดใบไม่อัดตัวกันแน่นต้นจะตั้งตรงสูง ได้แก่ กรีนคอส (Green cos) ผักกาดหอมชนิดที่ 2 และ 3 มีการผลิตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากได้รับความนิยมในการบริโภค (ราเชนทร์, 2548)

ผักกาดหอมคอสพันธุ์โรมานา (*Lactuca sativa* L. var. *romana*) เป็นผักกาดหอมชนิดใบที่นิยมบริโภค (ราเชนทร์, 2548) ปัจจุบันคนไทยนิยมบริโภคผักกาดหอมสดมากขึ้นและนำมาประกอบอาหารได้หลายชนิด จนได้รับสมญาว่าเป็น The King of Salad Plant (Shoemaker, 1949; Thompson and Kelly, 1978) เดิมมีการนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาแพง จึงนิยมปลูกแบบไฮโดรโปนิกส์ (ธรรมศักดิ์, 2544) ผักกาดหอมเป็นผักที่สำคัญและนิยมปลูกในภาคใต้ มีพื้นที่ปลูก 2,896 ไร่ พื้นที่เก็บเกี่ยว 2,113 ไร่ ผลผลิต 1,934 ตันต่อปี และผลผลิตเฉลี่ย 915 กิโลกรัมต่อไร่ (ประวิตรและคณะ, 2545) ผักกาดหอมตอบสนองค่า EC อยู่ระหว่าง 0.8-1.2 dS/m ค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 5.5-6.5 อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตประมาณ 21-26 °C และอายุการเก็บเกี่ยว 40-50 วันหลังย้ายปลูก (มบุญ, 2544) คุณค่าทางโภชนาการของผักกาดหอมและปริมาณธาตุอาหารที่พบในใบพืช แสดงในตารางที่ 2.1

ลักษณะการเจริญเติบโตของพืช (ลูติพันธ์, 2542)

ลักษณะการเจริญของพืชเป็นแบบ Sigmoid curve จะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับช่วงอายุของพืชแต่ละชนิด เมื่อนำข้อมูลการศึกษาการเจริญเติบโต เช่น น้ำหนัก ความสูง พื้นที่ใบ หรือปริมาณการสะสมธาตุอาหารที่มีความสัมพันธ์กับเวลาซึ่งมีอัตราการเจริญเป็น 4 ระยะคือ

1) Exponential phase เป็นระยะที่มีอัตราการเจริญช้ามาก แต่ในพืชที่มีอายุสั้นใช้เวลาไม่เกิด 1-3 สัปดาห์

2) Linear phase เป็นระยะที่พืชมีอัตราการเจริญสูง

3) Declining phase เป็นระยะที่พืชมีอัตราการเจริญลดลง

4) Steady state เป็นระยะที่พืชมีอัตราการเจริญคงที่เป็นระยะที่พืชมีการสะสมน้ำหนักได้สมดุลกับที่สูญเสียไป

ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช

สามารถจำแนกปัจจัยได้เป็น 2 ประเภท คือ ปัจจัยภายในและปัจจัยภายนอก (ดิเรก, 2546)

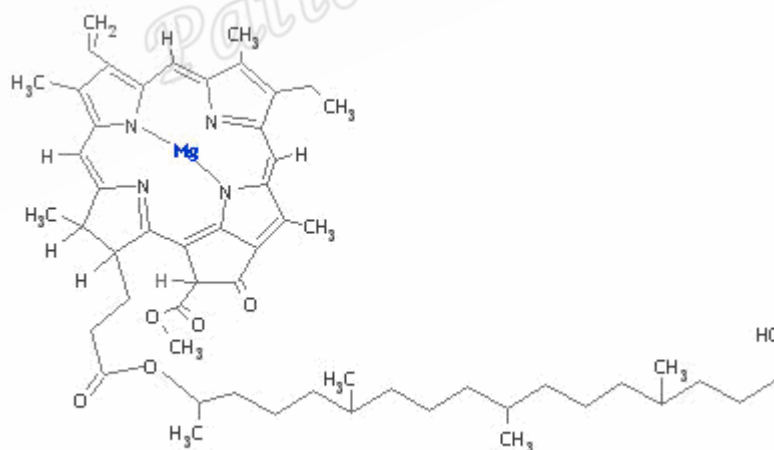
1. ปัจจัยภายใน ได้แก่ พันธุกรรมของพืชเป็นตัวควบคุมคุณลักษณะและถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมของพ่อและแม่ไปสู่ลูกหลาน ควบคุมปฏิกิริยาทางชีวเคมีโดยการควบคุมการสังเคราะห์เอนไซม์ และกำหนดโครงสร้างของของโปรตีนภายในเซลล์พืช สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชเป็นฮอร์โมนที่พืชสร้างขึ้นเอง (Plant hormones) และรงควัตถุของพืช

รงควัตถุที่ช่วยในการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช

รงควัตถุที่ช่วยในการสังเคราะห์ด้วยแสงเป็นรงควัตถุสีเขียวที่อยู่ภายในคลอโรพลาสต์ ในส่วนของกรานา (grana) เป็นสารประกอบจำพวกไขมัน ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น แอลกอฮอล์ อะซีโตน และอีเธอร์ ทำหน้าที่สังเคราะห์ด้วยแสงได้โดยตรง พบในสิ่งมีชีวิตที่สังเคราะห์ได้ด้วยแสง เช่น พืช สาหร่าย และแบคทีเรีย รงควัตถุที่พบในพืชแบ่งได้ 2 กลุ่ม ได้แก่ (กฤษฎี, 2541; จินดารัตน์, 2549)

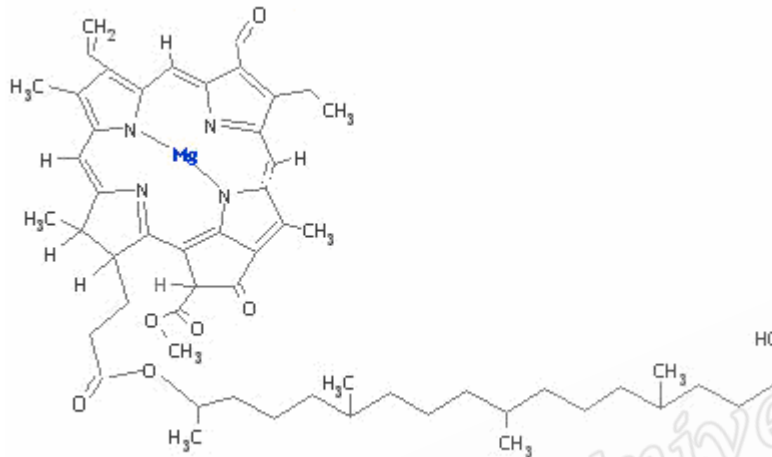
กลุ่มที่ 1 คลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) ประกอบด้วย

1. คลอโรฟิลล์เอ (Chlorophyll a) มีสูตรโมเลกุล $C_{55}H_{72}N_2O_5Mg$ (รูปที่ 2.1) เป็นรงควัตถุสีเขียวแกมน้ำเงิน พบในพืชทุกชนิดที่สังเคราะห์แสงได้ จะดูดแสงได้ดีที่สุดที่ความยาวคลื่น 680 และ 700 nm (Bernard and Anderson, 1940)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของคลอโรฟิลล์เอ (Von Elbe and Schwartz, 1996)

2. คลอโรฟิลล์บี (Chlorophyll b) มีสูตรโมเลกุล $C_{55}H_{70}N_4O_6Mg$ (รูปที่ 2.2) เป็นรงควัตถุสีเขียวแกมเหลือง พบในพืชเกือบทุกชนิด จะดูดแสงได้ดีที่สุดที่ความยาวคลื่น 480, 640 และ 650 nm (Oran, 1933)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของคลอโรฟิลล์บี (Von Elbe and Schwartz, 1996)

3. คลอโรฟิลล์ซี (Chlorophyll c) ไม่พบในพืชชั้นสูง แต่พบในสาหร่ายสีน้ำตาลและไดอะตอม ดูดแสงได้ดีที่สุดที่ความยาวคลื่น 645 nm

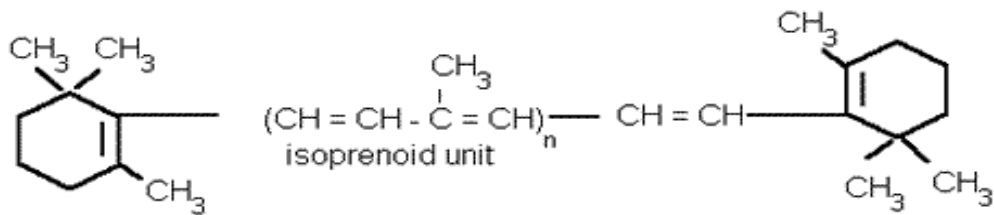
4. คลอโรฟิลล์ดี (Chlorophyll d) ไม่พบในพืชชั้นสูงแต่พบในสาหร่ายสีแดงบางชนิด

หน้าที่ของคลอโรฟิลล์

หน้าที่ของคลอโรฟิลล์ที่สำคัญคือการสังเคราะห์แสง สุนทรี (2546) รายงานว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ลดลงจากการปลูกยูคาลิปตัสในวัสดุปลูกที่มีระดับ pH เป็นกลางถึงด่าง ทำให้ขาดธาตุเหล็กไปซึ่งมีผลต่อสังเคราะห์ด้วยแสง ส่วน Chen and Barak (1982) รายงานว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์ยังความสัมพันธ์กับปริมาณธาตุอาหาร หากพืชขาดธาตุเหล็กก็จะหยุดสร้างคลอโรฟิลล์จึงส่งผลต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

กลุ่มที่ 2 แครโรทีนอยด์

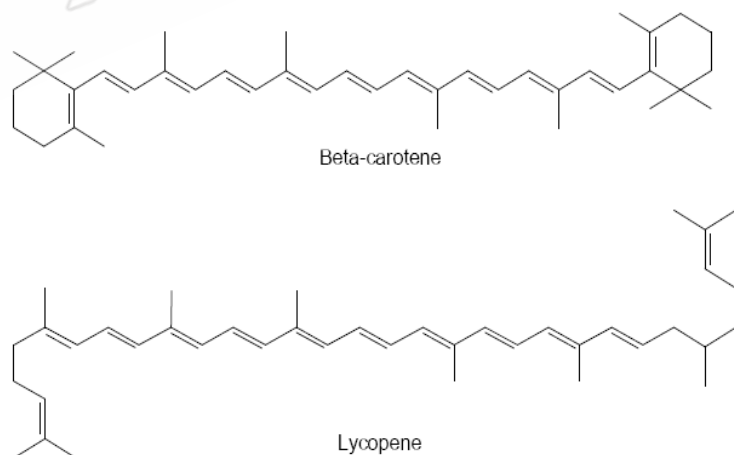
แครโรทีนอยด์ (Carotenoids) เป็นรงควัตถุที่พบในคลอโรพลาสต์ (Chloroplast) และโครโมพลาสต์ (Chromoplast) ของพืชชั้นสูง สาหร่ายบางชนิด และจุลินทรีย์ที่สังเคราะห์แสงได้ โครงสร้างโมเลกุลของแครโรทีนอยด์ประกอบด้วยหน่วยไอโซพรีน (Isoprene unit) จำนวน 8 หน่วย เกิดจากพันธะโควาเลนต์ และการคอนจูเกตของพันธะคู่เป็นสายยาว (Extensive conjugated double bond) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของแคโรทีนอยด์ (Von Elbe and Schwartz, 1996)

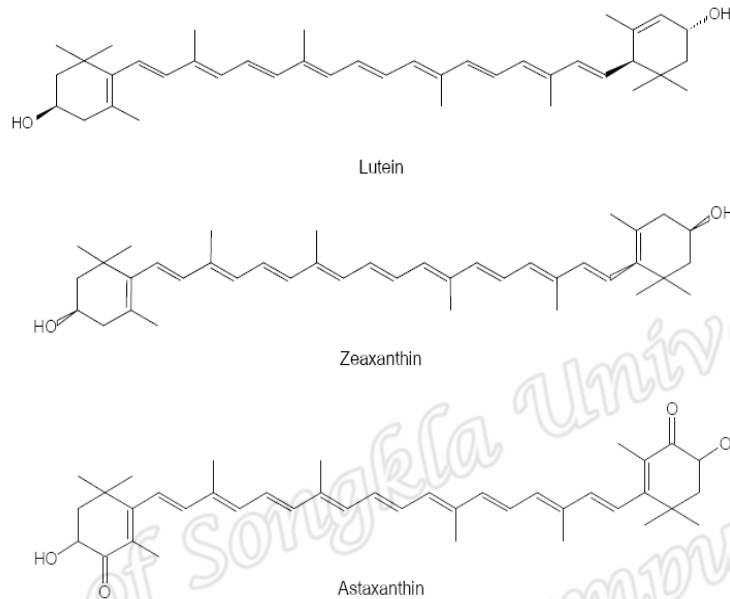
ด้วยเหตุนี้ทำให้แคโรทีนอยด์สามารถดูดกลืนพลังงานแสงอัลตราไวโอเล็ต และแสงสีขาวย ซึ่งเป็นสมบัติในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Magels *et al.*, 1993) ส่วน Demming *et al.*, (1996) รายงานว่า แคโรทีนอยด์ในพืชจะดูดกลืนพลังงานแสง ส่งต่อไปยังคลอโรฟิลล์ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง และเป็นตัวจับรังสีอัลตราไวโอเล็ต จึงป้องกันพืชจากปฏิกิริยาออกซิเดชันจากแสงแดด (Photooxidation) และยังป้องกันการทำลายเซลล์จากอนุมูลอิสระ (Free radical) แคโรทีนอยด์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ประกอบด้วย (Verasak, 2005)

1. แคโรทีน หรือ Hydrogenated carotenoid derivatives มีสูตรโมเลกุล $\text{C}_{40}\text{H}_{56}$ ซึ่งมีสีแดงและสีส้ม พบในหัวของ แครอท ผลมะเขือเทศ ในผลไม้สีเหลืองของพืชบางชนิด และมีอยู่ในเซลล์ของสัตว์บาง ชนิด เป็นสารไม่มีขั้ว และละลายได้ในไขมัน เช่น เบต้าแคโรทีน (Beta carotene) และไลโคพีน (Lycopene) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ Hydrogenated carotenoid derivatives (Verasak, 2005)

2. แชนโทฟิลล์ หรือ Oxygenated carotenoid derivatives มีสูตรโมเลกุล $C_{40}H_{55}OH$ ซึ่งมีสีเหลืองและสีน้ำตาล พบในพืช 2 ชนิดคือ Cryptoxanthin (Ranganna, 1977) ละลายในไขมันได้น้อยกว่า แคโรทีนอยด์กลุ่มแรก เช่น ลูทีน (Lutein) ซีแซนทีน (Zeaxanthin) และ แอสตาแซนทีน (Astaxanthin) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของ Oxygenated carotenoid derivatives (Verasak, 2005)

หน้าที่ของแคโรทีนอยด์ ได้แก่

1. ช่วยในการสังเคราะห์แสง โดยแคโรทีนอยด์จะช่วยดูดพลังงานแสง และส่งพลังงานผ่านไปกับคลอโรฟิลล์ เอ เมื่อให้พืชได้รับแสงช่วงคลื่น 400-500 nm จะเป็นช่วงที่แคโรทีนอยด์ดูดแสงได้ดีที่สุด แต่แสงในช่วงนี้คลอโรฟิลล์เอจะดูดได้น้อย การถ่ายทอดพลังงานของแคโรทีนอยด์ไปยังคลอโรฟิลล์เอจะมากหรือน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับชนิดของแคโรทีนอยด์ โดยปกติแล้วจะอยู่ระหว่างร้อยละ 20-70 (พันทวี, 2529)

2. ป้องกันการทำลายคลอโรฟิลล์ในสภาพที่มีแสง (Photooxidation) แคโรทีนอยด์สามารถยับยั้งกระบวนการ Photooxidation ได้จากการทดลองกับข้าวโพดกลายพันธุ์ (Corn mutant) ที่ไม่สามารถสร้างแคโรทีนอยด์ได้ เมื่อพืชได้รับแสงจะมีการสร้างคลอโรฟิลล์ตามปกติ แต่หากพืชได้รับแสงเป็นเวลานาน คลอโรฟิลล์ที่มีอยู่จะถูกทำลาย เพราะฉะนั้นพืช

สามารถสร้างคลอโรฟิลล์ได้ แต่ไม่สามารถป้องกันการทำลายของแสงได้ หากไม่มีแคโรทีนอยด์ (อาภัสสร, 2536)

2. ปัจจัยภายนอก ได้แก่ สิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโต ถ้าหากไม่มีความเหมาะสมแล้วก็จะทำให้พืชเจริญเติบโตได้ยาก ซึ่งปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชที่สำคัญ ได้แก่ ธาตุอาหาร แสง ความเป็นกรด-ด่าง ค่าการนำไฟฟ้า อุณหภูมิ และโรคพืช

1. ธาตุอาหาร

ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชมีอยู่ 16 ธาตุ ซึ่งพืชแต่ละชนิดมีความต้องการแตกต่างกันไป สามารถแบ่งธาตุอาหารออกได้เป็นสองกลุ่มคือ มหาธาตุและจุลธาตุ

1. มหาธาตุ (Macronutrients) คือธาตุอาหารที่พืชต้องการปริมาณมากในการเจริญเติบโต มี 9 ธาตุ แบ่งออกเป็น ธาตุอาหารหลัก และธาตุอาหารรอง

1.1 ธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม (มนูญ, 2544; ยงยุทธ, 2546; สมบุญ, 2548)

ไนโตรเจน (N)

เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นมากสำหรับพืชผักเป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์เป็นส่วนประกอบโครงสร้างของพืช เช่น คลอโรฟิลล์ กรดอะมิโนและองค์ประกอบของโปรตีน ซึ่งเกี่ยวข้องกับขบวนการเจริญเติบโต พืชนำไนโตรเจนไปใช้ประโยชน์ในรูปไนเตรท (NO_3^-) แอมโมเนียม (NH_4^+) หรือยูเรีย ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) ซึ่งหน้าที่ของไนโตรเจนที่มีต่อพืชดังนี้

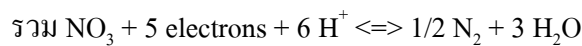
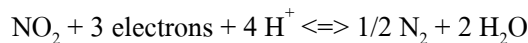
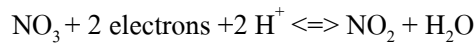
- มีผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโต การออกดอก การติดผล การเจริญของผล และคุณภาพของผลผลิต

- ถ้าไนโตรเจนสูงมากจะทำให้ต้นพืชมีการขยายเซลล์กว้างทำให้ต้นมีการอ่อนแอต่อการทำลายของโรคแต่อย่างไรก็ตามผักที่นิยมปลูกโดยไม่ใช้ดินจะนิยมกินใบและเก็บเกี่ยวผลผลิตเร็วจึงนิยมให้ธาตุอาหารพืชไนโตรเจนปริมาณสูงสำหรับการปลูกพืชไม่ใช้ดิน

- เนื่องจากไนโตรเจนเป็นธาตุที่เคลื่อนย้ายได้ง่ายในพืช เมื่อพืชขาดไนโตรเจน ไนโตรเจนก็จะเคลื่อนย้ายจากใบล่างขึ้นไปยังส่วนยอด อาการขาดไนโตรเจนจึงสังเกตได้จากใบล่าง

ไนเตรท (NO_3^-) เป็นรูปหนึ่งของไนโตรเจนที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ การเปลี่ยนรูปแบบให้พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้เกิดจากกระบวนการ Nitrification เป็นปฏิกิริยา Oxidation ที่ดึงออกซิเจนโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียใช้ออกซิเจนใช้

แอมโมเนียมเป็นแหล่งพลังงานและทำให้เกิดไนไตรท์ ซึ่งเปลี่ยนเป็นไนเตรท ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$) ซึ่งจะพืชนำไนเตรทไปใช้สร้างสารประกอบอินทรีย์และเปลี่ยนไปเป็นกรดอะมิโนตามลำดับ (วุฒิพงศ์, 2546) ส่วนกระบวนการ Denitrification เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับ โดยเปลี่ยนไนเตรทเป็นไนไตรท์ และสลายไนไตรท์เป็นก๊าซไนโตรเจน (NO_2) ออกจากระบบไปในการสลายไนเตรท ดังนี้



ในสภาพไม่มีออกซิเจน แบคทีเรียบางชนิดสามารถสร้างออกซิเจนได้เองจากไนเตรท และได้ผลผลิตเป็นก๊าซไนโตรเจนกลับคืนสู่บรรยากาศ



การหายใจของแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนจะเปลี่ยนไนเตรท ไปเป็นไนไตรท์ โดยอัตราความเร็วจะขึ้นอยู่กับ การใช้ไฮโดรเจนไอออน Denitrification เป็นปฏิกิริยาที่ใช้แบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนสองจำพวกคือ

1. Heterotrophic Denitrification Reaction (HDR) คือ ปฏิกิริยาสลายไนเตรทโดยแบคทีเรียจำพวก Heterotrophic (แบคทีเรียที่สร้างอาหารจากสารอินทรีย์) ใช้ไนเตรทสำหรับหายใจและเปลี่ยนเป็น ไนโตรเจน

2. Autotrophic Denitrification Reaction (ADR) คือ ปฏิกิริยาสลายไนเตรทโดยแบคทีเรีย จำพวก Autotrophic (แบคทีเรียสร้างอาหารจากสารอนินทรีย์ เช่น กำมะถัน) หรือที่เรียกว่า Chemoautotrophic bacteria คือ สามารถสร้างพลังงานจากกำมะถันและหาอาหารจากสารอนินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบของ เช่นคาร์บอนไดออกไซด์ใน ระบบที่มีออกซิเจนน้อย (Biological Nutrient Export System Using Asd, 2008)

ฟอสฟอรัส (P)

เป็นธาตุที่เกี่ยวข้องกับสารที่ทำหน้าที่ถ่ายทอดพลังงานอยู่ในองค์ประกอบของกรดนิวคลีอิก สารพลังงานสูงพวก ATP, ADP และฟอสโฟไลปิด มีบทบาทต่อกระบวนการ Metabolism พืชนำฟอสฟอรัสมาใช้ประโยชน์ในรูป Monobasic

orthophosphate ($H_2PO_4^-$) และ Dibasic orthophosphate (HPO_4^{2-}) หน้าที่ของฟอสฟอรัสมีดังนี้

- เป็นองค์ประกอบของสารพลังงานสูงซึ่งเป็นสารที่ทำหน้าที่ถ่ายทอดพลังงานระหว่างสารต่างๆ ของระบบเช่น การสังเคราะห์ การหายใจ การดูดน้ำและแร่ธาตุ และกระบวนการเมแทบอลิซึมต่างๆ เป็นต้น

- เป็นสารตัวกลางในลำดับปฏิกิริยาต่างๆ ในเมแทบอลิซึม เช่น Glucose-1-phosphate และ Fructose 1, 6 diphosphate เป็นต้น

- เป็นสารที่เป็นแหล่งสะสมฟอสเฟต เช่น Phytin และ Phospholipid

- การขาดธาตุฟอสฟอรัสจะมีผลให้มีการติดผลน้อยลงและในพืชมีหัวมีการสะสมอาหารน้อยลง

โพแทสเซียม (K)

เป็นธาตุที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการในการเคลื่อนย้ายธาตุอาหาร การสังเคราะห์โปรตีนและคาร์โบไฮเดรต รูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชของโพแทสเซียมคือ K^+ ซึ่งหน้าที่ของโพแทสเซียมที่มีต่อพืชดังนี้

- ส่งเสริมการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในการสังเคราะห์แสง

- พืชที่ขาดโพแทสเซียมมัก ต้นพืชเล็กบอบบางและหักล้มง่าย ผลขนาดเล็ก สีผิวไม่สวย การปลูกพืชไม่ใช้ดินจึงให้ในปริมาณสูง

1.2 ธาตุอาหารรอง ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถัน (มบุญ, 2544; ยงยุทธ, 2546; สมบุญ, 2548)

แคลเซียม (Ca)

ธาตุแคลเซียมมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของโครงสร้างผนังเซลล์ของพืชและ เกี่ยวข้องกับการปฏิสนธิ การแบ่งเซลล์และการเจริญเติบโตของเซลล์ และยังช่วยในปัจจัยรวมของเอนไซม์ในกระบวนการสร้างโปรตีน รูปของแคลเซียมที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้คือแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ซึ่งมีบทบาทในการช่วยดูดซับธาตุโพแทสเซียมได้มากขึ้นหากขาดแคลเซียมพืชจะแสดงอาการ ก้นผลเน่าในมะเขือเทศ และผิวผลแอปเปิ้ลมีรอยบุ๋ม ใสน้ำในพืชตระกูลกะหล่ำ และมีอาการปลายใบยอดไหม้ในผักกาดหอม

แมกนีเซียม (Mg)

แมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบหลักของโมเลกุลคลอโรฟิลล์และมีส่วนเคลื่อนย้ายธาตุฟอสฟอรัส พืชที่ขาดแมกนีเซียมทำให้มีอาการเหลือง (Chlorosis) ที่ใบอ่อน

และใบแก่ รูปของแมกนีเซียมที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้คือ แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ความเป็นประโยชน์จะสูงในดินที่มีความเป็นกลางหรือเป็นด่าง การดูดแมกนีเซียมจะลดลง หากมีโพแทสเซียม แอมโมเนียม แคลเซียม แมงกานีส และไฮโดรเจนไอออนมาก แมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์ซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช มีส่วนเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์โปรตีน หากขาดแมกนีเซียมพืชจะแสดงอาการใบเหลืองซีด พืชสังเคราะห์โปรตีนได้น้อย แต่กลับมีการสะสมแป้งในใบมากขึ้นทำให้มีน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้น

กำมะถัน (S)

กำมะถันรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชคือซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) โดยกำมะถันเป็นองค์ประกอบของกรดอะมิโน ซีสทีน และเมไทโอนีน จึงเป็นองค์ประกอบของโปรตีนด้วยเช่นกัน พืชที่ขาดธาตุนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงด้านเมตาบอลิซึม เช่น กระบวนการสังเคราะห์โปรตีนถูกยับยั้ง มีการสะสมสารประกอบอินทรีย์ในโตรเจนที่ละลายได้ในลำดับส่วนนี้ มีอะไมด์ในสัดส่วนที่มาก และยังมีการสะสมในเตรทด้วย พืชจะแสดงอาการขาดกำมะถัน โดยทั้งในใบแก่ และใบอ่อนจะเหลืองเหมือนกัน

1.3 ธาตุอาหารที่ พืชได้รับจากน้ำ และอากาศ ได้แก่ คาร์บอน, ไฮโดรเจน และออกซิเจน (มนูญ, 2544; ยงยุทธ, 2546; สมบุญ, 2548)

คาร์บอน (C)

เป็นองค์ประกอบหลักในโครงสร้างของพืช เช่น คาร์โบไฮเดรต ลิพิด และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ มีความจำเป็นในกระบวนการสังเคราะห์แสง

ออกซิเจน (O)

ใช้ในกระบวนการหายใจเพื่อออกซิไดส์สารอาหารพวกคาร์โบไฮเดรต ย่อยให้เป็นน้ำตาลขนาดเล็กได้เป็นพลังงานเพื่อพืชนำไปใช้ในกระบวนการเจริญเติบโต โดยออกซิเจนเป็นองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรต ลิพิด และสารประกอบอินทรีย์ในพืช

ไฮโดรเจน (H)

มีความจำเป็นในกระบวนการสังเคราะห์แสงเป็นองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตลิพิดและสารประกอบอินทรีย์ในพืช ซึ่งพืชสามารถได้จากน้ำเป็นส่วนใหญ่หรืออาจได้จากบรรยากาศ

2. จุลธาตุ (Micronutrients) คือ ธาตุอาหารเสริมที่พืชต้องการในปริมาณเพียงเล็กน้อยก็เพียงพอต่อการดำรงชีพ ซึ่งมีความสำคัญต่อพืชไม่ยิ่งหย่อนกว่ากลุ่มธาตุ

อาหารอื่น ๆ เพราะถ้าหากมีไม่เพียงพอกับความต้องการของพืชแล้ว พืชจะเจริญเติบโต และให้ผลผลิตน้อยลง มี 7 ธาตุ ได้แก่ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544)

คลอรีน (Cl)

คลอรีนมีบทบาทในกระบวนการสังเคราะห์แสง ช่วยเพิ่มความเป็นกรดในเซลล์ กระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ สภาพทั่วไปคลอรีนจะมีเพียงพอต่อความต้องการของพืช

โบรอน (B)

โบรอนเกี่ยวข้องกับกระบวนการเจริญเติบโตของพืช ทำให้พืชใช้ธาตุแคลเซียมดีขึ้นในการสร้างโครงสร้างผนังเซลล์และอาจช่วยในกระบวนการเคลื่อนย้ายสารอาหารในพืช หากขาดทำให้การสร้างน้ำตาลลดลงในพืช

แมงกานีส (Mn)

แมงกานีสมีบทบาทในกิจกรรมกระบวนการสังเคราะห์แสง ช่วยกระตุ้นเอนไซม์ ในการสังเคราะห์กรดไขมันและเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิด DNA และ RNA หากขาดทำให้ธาตุเหล็กในรูป Fe^{2+} เกิดเป็นพิษกับต้นพืชและมีลักษณะใบต่างในตระกูลถั่ว ถ้ามามากไปทำให้ Fe^{3+} ถูกนำไปใช้ได้ลดลง ทำให้ต้นพืชขาดธาตุเหล็ก

ทองแดง (Cu)

ทองแดง เป็นตัวกระตุ้นและตัวนำของอิเล็กตรอนในการตรึงไนโตรเจน ถ้าหากขาดทำให้ต้นพืชอ่อนแอใบเหลืองซีดหรือเป็นจุดเหลืองตาย (Chlorotic spot) ซึ่งพบในถั่วเหลือง

สังกะสี (Zn)

สังกะสี ธาตุที่เกี่ยวข้องในการสร้างสารควบคุมการเจริญเติบโตพวกออกซิน (Auxin) ปลายยอดและเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์หากขาดทำให้ต้นพืชเตี้ยใบเล็ก

โมลิบดีนัม (Mo)

โมลิบดีนัมเป็นธาตุที่เกี่ยวข้องในการเปลี่ยนไนเตรทไปเป็นแอมโมเนียมเพื่อไปสร้างกรดอะมิโนในเซลล์ มีความจำเป็นในการตรึงไนโตรเจน ถ้าหากขาดทำให้พืชตระกูลถั่วมีประสิทธิภาพในการตรึงไนโตรเจนในบรรยากาศน้อยลง

เหล็ก (Fe)

เหล็กช่วยให้พืชสังเคราะห์แสง โดยเป็นตัวพาอะตอมออกซิเจนในกระบวนการหายใจและมีบทบาทในการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ และเป็นสารประกอบของ

Flavoprotein มีความจำเป็นในการสร้างน้ำตาลและแป้ง รูปของเหล็กที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้คือ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ถ้าหากขาดทำให้ใบเหลืองซีดทั้งใบอ่อน และใบแก่

3. แสง

แสง มีบทบาทสำคัญในการสังเคราะห์แสงของพืชมีผลต่อการเจริญเติบโต และการพัฒนาของพืช เช่น การงอกของเมล็ด การโคงงอ และการออกดอกของพืช แสงที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชมี 3 ลักษณะได้แก่ (สมบุญ, 2548)

1. ความเข้มของแสง (Light intensity) หากได้รับมากหรือน้อยเกินไป ส่งผลให้ใบพืชได้รับอันตราย ทำให้การสังเคราะห์แสงของพืชไม่เหมาะสม และผลผลิตเสียหายได้ ซึ่ง Grimstad (1991) รายงานว่า การปลูกผักกาดหอมที่มีความเข้มของแสงฟลูออเรสเซนต์ที่ต่างกันทำให้มีผลผลิตและน้ำหนักแห้งแตกต่างกัน

2. ความยาวของช่วงแสง (Light duration) คือ ระยะเวลาที่พืชได้รับแสงต่างสำหรับพืชที่ไวต่อแสง การออกดอกจะสัมพันธ์ กับช่วงระยะเวลา ความยาวของแสงในแต่ละวันเป็นอย่างมาก และพืชที่จัดเป็นพวกไม่ไวต่อแสง ช่วงระยะเวลาความยาวของแสงไม่มีผลต่อการออกดอก สมบุญ (2548) รายงานว่า พืชวันสั้น (ถั่วเหลือง) พืชวันยาว (ผักกาดหวาน) และพืชที่ไม่ตอบสนองต่อช่วงแสง (มะเขือเทศ) จะมีความแตกต่างกันของช่วงแสงที่กระตุ้นระยะการออกดอกของพืช

3. คุณภาพของแสง (Light quality) ช่วงแสงที่พืชสามารถนำไปใช้สังเคราะห์แสงได้ คือ ช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 390-760 nm ซึ่ง Chadjaa *et al.* (2001) รายงานว่า การใช้แสงไฟฟ้ายวดยลวด ชนิด High pressure sodium ที่ความเข้มแสงเท่ากับ $50 \text{ mol/m}^2/\text{s}$ ทำให้ผักกาดหอมมีน้ำหนักสดเพิ่มขึ้นร้อยละ 70

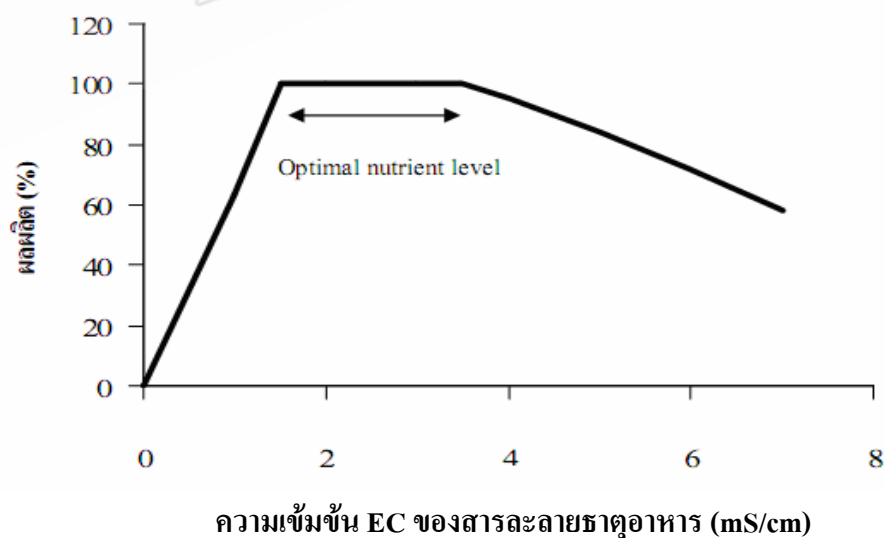
4. ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ความเป็นกรด-ด่าง มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช เนื่องจากความเป็นกรด-ด่างในสารละลายอาหาร เกี่ยวข้องกับความสามารถของสารละลายธาตุอาหารที่จะอยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดซึมธาตุอาหารไปใช้ประโยชน์ได้ ปกติควรรักษาค่าความเป็นกรด-ด่างในช่วง 5.8-7.0 เพราะเป็นช่วงที่ธาตุอาหารพืชต่างๆ สามารถจุนรูปในสารละลายที่พืชนำไปใช้ได้ดี ค่าความเป็นกรด-ด่างในสารละลายธาตุอาหารพืชเปลี่ยนแปลงได้หลายสาเหตุ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากรากพืชดูดธาตุอาหารแล้วปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออนหรือไฮดรอกไซด์ไอออน จากรากสู่สารละลายธาตุอาหาร ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายธาตุอาหารเปลี่ยนแปลงไป ตัวอย่างเช่น พืชดูดแอนไอออนพวก ไนเตรท ซัลเฟต และฟอสเฟตไอออน ก็จะปลดปล่อยไฮดรอกไซด์ไอออนสู่สารละลายธาตุอาหาร ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายธาตุอาหารเพิ่มขึ้น

ส่วนกรณีที่พืชดูดแคตไอออนพวก แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม และแอมโมเนียมไอออน ก็จะปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออนสู่สารละลายธาตุ ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายธาตุอาหารลดลง โดยทั่วไปธาตุอาหารในสารละลายธาตุอาหาร พืชจะดูดแอนไอออนมากกว่า แคตไอออน (ราเชนทร์และคณะ, 2548) Silber *et al.* (2000) รายงานว่า การปลูกต้น Safari Sunset แบบ Aeroponics ซึ่งมี pH 2 ระดับ คือ 5.50 และ 7.50 พบว่า ที่ระดับ pH เท่ากับ 5.5 เป็นปัจจัยสำคัญต่อการควบคุมการเจริญของเซลล์ราก และปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม สังกะสี และแมงกานีส ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของต้น Safari Sunset ส่วน Tu and Ma (2003) รายงานว่า การปลูกเฟิร์นในระบบ hydroponics ที่ระดับ pH เท่ากับ 5.21 และ 6.33 ทำให้เฟิร์นสามารถนำฟอสฟอรัสไปใช้ประโยชน์ได้เพิ่มขึ้น

5. ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC)

ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (Electrical Conductivity; EC) หมายถึง ความสามารถของสารละลายที่จะให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เนื่องจากปุ๋ยที่ละลายในน้ำแตกตัวเป็น ไอออน ทำให้น้ำสามารถนำไฟฟ้าได้ (ดิเรก, 2546) Resh (1985) รายงานว่า ระดับ EC ของ สารละลายธาตุอาหารมีความสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตของพืชคือ เมื่อไม่มีปุ๋ยในน้ำพืชไม่สามารถเจริญเติบโตได้ แต่เมื่อเติมปุ๋ยลงไปให้น้ำน้อยเกินไป พืชจะมีการเจริญเติบโตในระดับที่ต่ำ และเมื่อเติมปุ๋ยลงไปให้น้ำระดับเหมาะสมกับความต้องการ พืชจะมีการเจริญเติบโตในระดับที่เหมาะสมและให้ผลผลิตสูงสุด แต่หากเติมปุ๋ยลงไปให้น้ำมากเกินไประดับผลผลิตของพืชจะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารกับปริมาณผลผลิตพืช (Resh, 1985)

Iersel (1999) ได้ทดลองใช้สารละลายธาตุอาหารสูตร 20N-4.4P-16.6K ที่ระดับ EC เท่ากับ 1.2-1.8 dS/m พบว่าทำให้ต้น Majestic Giant มีการเจริญเติบโตดีที่สุด จิตตานันท์ (2545) ได้ทดลองปลูกผักกาดหอมพันธุ์ Green royal ด้วยระบบ Deep Water Culture (DWT) จากสูตรสารละลายธาตุอาหารของ Enshi พบว่า ระดับ EC เท่ากับ 0.75 dS/m เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอมพันธุ์ Green royal มากที่สุด ส่วน Auerswald *et al.* (1999) รายงานในการทดลองว่า การปลูกมะเขือเทศในสารละลายธาตุอาหารที่มีระดับ EC เท่ากับ 1.0 3.5 และ 6.0 dS/m พบว่า ระดับ EC เท่ากับ 1.0 และ 3.5 dS/m มีปริมาณน้ำตาลและกรดเพิ่มขึ้นทำให้รสชาติและรสสัมผัสดีขึ้น แต่ระดับ EC เท่ากับ 6.0 dS/m มีปริมาณน้ำตาลและกรดจะลดลง ซึ่งสอดคล้องกับ Resh (1985) รายงานถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารกับปริมาณผลผลิตของพืชที่เรียกว่า ระดับความเข้มข้นของปุ๋ยที่น้อยที่สุดทำให้ผลผลิตสูงสุด (Optimal nutrient level)

6. อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีบทบาทต่อกระบวนการงอกของเมล็ด การแบ่งเซลล์ สังเคราะห์แสง การหายใจ การดูดธาตุอาหาร การคายน้ำ และกิจกรรมของเอนไซม์ต่าง ๆ นอกจากนี้อุณหภูมิยังมีผลต่อการละลายออกซิเจนในน้ำ โดยเฉพาะในประเทศไทยมักมีสภาพอากาศร้อนถ้ามีอุณหภูมิสูง (มากกว่า 30 °C) ทำให้ปริมาณออกซิเจนในสารละลายธาตุอาหารลดลง รากพืชได้รับออกซิเจนไม่เพียงพอทำให้อัตราการการหายใจและการเจริญของรากลดลง (Resh, 1987; Benoit, 1992) นิพนธ์ (2547) รายงานว่า การปลูกพืชในระบบ NFT ที่อุณหภูมิสูง 37 °C ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเหลือเพียงร้อยละ 40 ทำให้พืชชะงักการเจริญเติบโต หากอุณหภูมิในสารละลายธาตุอาหารต่ำเกินไป (ต่ำกว่า 20 °C) ทำให้การนำธาตุอาหารไปใช้ประโยชน์ได้น้อยลง โดยเฉพาะโพแทสเซียม เหล็ก และแมงกานีส (ราชนทร์และคณะ, 2548) Park *et al.* (1995) ได้ทดลองปลูกผักกวางตุ้งในสารละลายธาตุอาหารที่อุณหภูมิเท่ากับ 15 °C พบว่า รากพืชไม่สามารถดูดธาตุฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมงกานีสไปใช้ประโยชน์ได้เพียงพอต่อการเจริญเติบโต ซึ่งอุณหภูมิในสารละลายธาตุอาหารที่เหมาะสมต่อการทำงานของรากพืชประมาณ 30 °C (ดิเรก, 2546)

7. โรคพืช

โรคพืชที่สำคัญในสารละลายธาตุอาหารประกอบด้วย โรครากเน่า โรคโคนเน่า และโรคเหี่ยว

1. โรครากเน่า เกิดจากเชื้อรา *Pythium* spp. อยู่ใน Kingdom Fungi Sub-division Mastigomycotina Class Oomycetes Order Peronosporales Family Pythiaceae Genus *Pythium* (Hawksworth, et al., 1983) เส้นใยไม่มีสี เจริญแตกแขนงได้ดี ไม่มีผนังกันตามขวาง ภายในเส้นใยสร้าง Sporangia ที่ปลายหรือกลาง เส้นใยมีลักษณะกลมรี sporangia ฝัง Germ tube เป็นเส้นใยสั้น ๆ และเกิด Vesicle ที่ปลายให้กำเนิด zoospore ซึ่งมี flagella ช่วยในการเคลื่อนที่ในน้ำได้อย่างรวดเร็ว และเคลื่อนที่เข้าหารากพืชโดยอาศัย Chemotaxis

กลไกการทำลายของเชื้อนี้คือเมื่อเชื้อสัมผัสกับรากพืชก็จะเข้าทำลายโดยเปลี่ยนเป็น encysted zoospore ที่ไม่มี flagella แล้วงอก germ tube แทะผ่านเข้าสู่เนื้อเยื่อพืช ทำให้พืชเกิดโรคทางราก และลำต้นเน่า (ไพโรจน์, 2525; ประสาทพร, 2534) ซึ่ง Labuschagne et al. (2002) รายงานว่า การปลูกพืชขึ้นง่ายด้วยระบบการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินในแอฟริกาใต้ ช่วงเดือนที่สภาพอากาศอบอุ่น พบว่า *Pythium* F-Group เข้าทำลายรากพืชทำให้รากเน่าอย่างรุนแรง ต้นแคระแกร็น และมีการตายสูงถึงร้อยละ 70

2. โรคโคนเน่า เกิดจากเชื้อรา *Phytophthora* spp. อยู่ใน Kingdom Stramenopila Phylum Oomycota การสืบพันธุ์แบ่งออกเป็น แบบอาศัยเพศโดยการสร้างสปอร์โอโอสปอร์ (Oospore) และแบบไม่อาศัยเพศจะสร้างสปอร์ซุโอสปอร์ (zoospore) ซึ่งใช้ flagella ในการเคลื่อนที่และแพร่กระจายโดยอาศัยน้ำเป็นตัวนำ (Brooks, 2004)

กลไกการทำลายของเชื้อสาเหตุโรคจะปล่อยซุโอสปอร์ไปเกาะผิวของพืช และสร้างแอปเพรสซอเรีย (appressoria) ทำหน้าที่เจาะเข้าไปในผิวพืช เส้นใยจะงอกออกมาจากอะเพรสซอเรียสเข้าไปกระจายในเซลล์ชั้นต่างๆ ของพืช เส้นใยที่อยู่ในบริเวณเซลล์ที่กำลังติดเชื้อ และเซลล์ที่ข้างเคียงเกิดการตายของเซลล์อย่างรวดเร็ว เนื้อเยื่อตายมีลักษณะเป็นรอยไหม้สีน้ำตาล (necrosis) (Judelson and Blance, 2005) Jonghe et al., (2005) รายงานว่า การปลูก witloof chicory แบบไฮโดรโปนิคส์ พบ zoospores เชื้อ *Phytophthora cryptogea* ความเข้มข้น 10^3 $\mu\text{g/mL}$ ในสารละลายธาตุอาหาร ทำให้รากพืชได้รับเสียหายร้อยละ 93.8

3. โรคเหี่ยวเกิดจาก เชื้อรา *Fusarium oxysporum* อยู่ใน Kingdom Fungi sub phylum Pyrenomycetes การสืบพันธุ์แบ่งออกเป็น แบบอาศัยเพศ ซึ่งจะสร้าง Slime mass ในโคโลนี สีชมพูใส และแบบไม่อาศัยเพศ จะสร้างสปอร์ได้ 3 แบบ คือ 1) macroconidia รูปร่างโค้ง

เล็กน้อย คล้ายพระจันทร์ครึ่งเสี้ยวมี 3-5 cell ผนังบางค่อนข้างใส ไม่มีสี 2) microconidia รูปไข่ มี 1-2 cell ผนังบาง ค่อนข้างใส ไม่มีสี 3) chlamydospore เป็นสปอร์ที่เกิดจากบางเซลล์ในเส้นใยมีการสะสมอาหารและมีผนังหนาขึ้นและหลุดออกมาเป็นส่วนขยายพันธุ์ (Marlatt, *et al.*, 1996)

กลไกการทำลายของเชื้อสาเหตุโรคแบ่งได้ 3 รูปแบบคือ 1) การเพิ่มจำนวนของเชื้อสาเหตุโรคอย่างรวดเร็วและเข้าอาศัยในท่อลำเลียงน้ำพืช ดูดสารอาหารจากพืชมาใช้ในการดำรงชีพ ซึ่งจะมีเส้นใยแผ่ขยายมากขึ้นทำให้เกิดการอุดตันท่อลำเลียง พืชจึงไม่สามารถลำเลียงน้ำได้ 2) การสร้างเอนไซม์และสารพิษ เช่น การปล่อย Lycomarasmine, fusaric acid และ dehydrofusaric acid ออกมาย่อยสลายเยื่อหุ้มเซลล์ของท่อลำเลียงน้ำทำให้ไม่สามารถกักเก็บน้ำได้ 3) กลไกการป้องกันพืช เมื่อมีเชื้อเข้ามาทำลาย พืชจะสร้าง gums หรือ tylose เพื่อสกัดการลุกลามของเชื้อ สิ่งที่พืชสร้างขึ้นทำให้เกิดการอุดตันในท่อลำเลียงน้ำมากขึ้น พืชที่อ่อนแอต่อโรคจึงแสดงอาการเหี่ยวอย่างรุนแรงและตายในที่สุด (Bost, 2001) ซึ่ง Horinouchi *et al.*, (2007) รายงานว่า การปลูกมะเขือเทศแบบไฮโดรโปนิคส์ พบอาการรากเหี่ยวเน่าจากการเข้าทำลายของเชื้อ *Fusarium equiseti* GF191 หลังการย้ายปลูก 71 ถึง 140 วัน

2.3.3 วิธีการกำจัดเชื้อโรคพืชในสารละลายธาตุอาหาร

1. วิธีทางกายภาพ ประกอบด้วย การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต และความร้อน

1) รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Radiation: UV) มีรายงาน การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต 28-84 W. ผ่านลงในสารละลายสามารถฆ่าเชื้อโรคในสารละลายธาตุอาหารสำหรับปลูกพืช (จิระเดช, 2547) และ ที่ช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 200-280 nm สามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ในสารละลายธาตุอาหารได้อย่างเหมาะสม (Rania, 1994) รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV-C) ที่ระดับความเข้มแสง 90 mj/cm³ สามารถควบคุมเชื้อรา *Pythium* spp. ในผักสลัดได้ (Benoit and Ceustermans, 1993) ระดับความเข้มแสง 88 mj/cm³ ควบคุมเชื้อ *Pythium aphanidermatum* และเชื้อแบคทีเรีย ในมะเขือเทศที่ปลูกในสารละลาย สามารถลดจำนวนโคโลนีเชื้อรา *Pythium aphanidermatum* ได้ 521 CFU mg⁻¹ และเชื้อแบคทีเรีย 3.51x10⁷ CFU mg⁻¹ (Zhang and Tu, 2000) โดยการให้รังสีอัลตราไวโอเล็ต 3 ครั้งต่อชั่วโมงที่ระดับความเข้มแสง 57.2 mj/cm³ สามารถลดจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ในสารละลายธาตุอาหารได้ 500-800 x10³ cell/mL ในมะเขือเทศ และ 10-50x10³ cell/mL ในข้าวโพด (Buyanosky *et al.*, 1981) นอกจากนี้ระดับความเข้มแสง 37 mj/cm³ ของ UV-C สามารถควบคุมเชื้อ *Botrytis cinerea* ของโรคน้ำราสีเทาในมะเขือเทศ (Charles *et al.*, 2008a) ผลมะเขือเทศสีเขียว (Charles *et al.*, 2008b; Liu *et al.*, 1993) หัวผักกาดแดง (Mercier *et al.*, 1993 a,b), มะนาว (Ben-Yehoshua *et al.*, 1992; Rodov *et al.*, 1992; hallewin *et*

al., 2005) และเบอร์รี่ (Sarig *et al.*, 1997; Cantos *et al.*, 2002) แต่การใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตมีผลทำให้ธาตุเหล็ก และแมงกานีสในสารละลายธาตุอาหารลดลง (ดิเรก, 2547) และมีราคาสูงในการติดตั้ง

2) ความร้อน (Heat treatment) สามารถให้ความร้อนฆ่าเชื้อแบคทีเรีย และไวรัสในสารละลายธาตุอาหารที่อุณหภูมิ 97 °C ก่อนนำไปปลูกคาร์เนชั่น (Van Os *et al.*, 1990)

2. วิธีทางเคมี

สารเคมีหลายชนิดที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคพืชได้แก่

1) คลอรีนใช้ในรูปของโซเดียมไฮเปอร์คลอไรต์ 5 mg/L สามารถฆ่าเชื้อรา *Fusarium* spp. ได้ ภายใน 15 นาที และคลอรีนจะสลายตัวภายในเวลา 24 ชั่วโมง ถ้าใช้ติดต่อกหลายวันเกิดการสะสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ไปขัดขวางการดูดธาตุอาหารพืชได้ (Price and Fox, 1984)

2) บีโนมิล (Benomyl) ใช้ 5 mg/L ในสารละลายธาตุอาหารพืชสามารถควบคุมการแพร่ระบาดของเชื้อรา *Pythium dissotocum* ได้ (Gold and Stanghellini, 1985)

3) สารลดแรงตึงผิว ใช้ชนิดไม่มีประจุที่ความเข้มข้น 20 mg/L สามารถควบคุมการแพร่ระบาดของเชื้อรา *Pythium* spp. (ดิเรก, 2547) การควบคุมโรครากเน่าสีน้ำตาล สาเหตุจาก Zoospore ของเชื้อรา *Phytophthora cryptogea* ในการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ใช้ Atplus MBA1301 (สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ) ที่ระดับความเข้มข้น 10 mg/mL ทำให้โครงสร้างหรือเซลล์ของเชื้อราแตกซึ่งมีประสิทธิภาพควบคุมโรคได้ดี (Jonghe *et al.*, 2005) และควบคุมการติดเชื้อในผักโขมได้ (Irish *et al.*, 2002) แสดงให้เห็นว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุสามารถใช้ในการควบคุมการติดเชื้อโรคทางรากในระบบไฮโดรโปนิคส์ได้ (Stanghellini and Rasmussen, 1994)

4) ซิลิกอน ใช้สารละลายซิลิกอน (โซเดียมซิลิเกตร้อยละ 27) ความเข้มข้น 200 mg/L สามารถควบคุมเชื้อรา *Pythium* spp. ในการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ ทำให้การเติบโตของเส้นใย และสปอร์แรงเจียมของเชื้อราลดลง (วารางคณา, 2545)

5) โอโซน ให้สารละลายธาตุอาหารผ่านเครื่องโอโซนหลายพันครั้งเป็นเวลา 20 นาทีจะทำให้สามารถฆ่าเชื้อ *Pythium xysporum* (Runia, 1994) หรือให้ก๊าซโอโซนเวลา 60 ถึง 75 นาที แล้วกรองผ่านเยื่อกรองขนาด 7 µm สามารถฆ่าเชื้อโรคในสารละลายธาตุอาหารพืช (จิระเดช, 2547)

3. วิธีทางชีวภาพ

โดยทั่วไปมักใช้ เชื้อรา ไตรโคเดอร์มา (*Trichoderma* spp.) ซึ่งอยู่ใน Sub-division Deuteromycotina Form-class Hyphomycetes Form-family Moniliaceae Genus *Trichoderma* (Samuels, 1996) เชื้อราชนิดนี้เป็นเชื้อราชั้นสูงที่เจริญได้ดีในดินเศษซากพืชซากของสิ่งมีชีวิต รวมทั้งจุลินทรีย์ และวัสดุอินทรีย์ตามธรรมชาติ สร้างเส้นใยสีขาวมีผนังกัน สีจางหรือไม่มีสี ผนังเรียบ แตกแขนง มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.5-1.2 μm สร้าง Chlamydospore ระหว่างเส้นใย มีลักษณะกลมผนังเรียบไม่มีสี มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6-12 μm Conidiophore มีลักษณะตรง แตกแขนงมาก แต่ไม่เป็นแบบ Verticillate รวมกันเป็นกลุ่มหลวม ๆ พบ Phialide เกิดขึ้นเดี่ยว ๆ หรือเป็นกลุ่มที่ปลายแขนงของ conidiophore มีลักษณะเรียวยาวขนาด $18 \times 2.5 \mu\text{m}$ และสร้างส่วนขยายพันธุ์ที่เรียกว่า โคนิเดีย (Conidia) และมีสปอร์แบบเซลล์เดี่ยวเป็นกลุ่มสี่เหลี่ยม บางชนิดมีสีขาหรือสีเหลือง ลักษณะค่อนข้างกลม ขนาด $2.8-3.2 \times 2.5-2.8 \mu\text{m}$ (Barnett and Hunter, 1972; Rifal, 1969) จีระเดช (2531) รายงานว่า เชื้อรา *Trichoderma* spp. เป็นเชื้อราปฏิปักษ์ต่อเชื้อสาเหตุโรคพืชได้ 3 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 การสร้างสารปฏิชีวนะ (Antibiosis) แบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 Trichothecenes กลุ่มที่ 2 Cyclic peptides และกลุ่มที่ 3 Isocyanide รูปแบบที่ 2 การแข่งขันในด้านปัจจัยในการดำรงชีวิต (Competition) และรูปแบบที่ 3 การเป็นปรสิต (Parasitism) ซึ่งแพรทอง (2549) รายงานว่า *Trichoderma hazzianum* CB-Pin-01 สามารถควบคุมโรครากเน่าในผักกาดหอมได้

กลไกการควบคุมเชื้อราสาเหตุโรคพืชของ *Trichoderma* จะพ่นรัดหรือแทงเข้าสู่ภายในเส้นใยเชื้อสาเหตุโรคพืช เพื่อแข่งขันการใช้อาหารกับเชื้อโรคพืชโดยใช้ส่วนของเหลวในเส้นใยเชื้อสาเหตุโรคพืชมาเป็นอาหาร ทำให้เกิดการฉีกขาดของผนังเส้นใยและเกิดการรั่วไหลของของเหลวภายในเส้นใยเกิดการตกตะกอนของ Organelles และ Cytoplasm ทำให้เชื้อราสาเหตุโรคพืชตายในที่สุด (Benhamou and Chet, 1996)

การใช้เชื้อราไตรโคเดอร์มา ชนิดสด อัตรา 100 g ต่อสารละลายธาตุอาหาร 200 L สามารถควบคุมหรือยับยั้งการเจริญของเชื้อราสาเหตุโรคพืชซึ่งประกอบด้วย เชื้อรา *Phythium* spp. เชื้อรา *Phytophthora* spp. เชื้อรา *Fusarium* spp. ในการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ได้ (จีระเดช, 2551) Windham et al., (1986) รายงานว่า เชื้อรา *Trichoderma* spp. ช่วยในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้ *T. harzianum* และ *T. koningii* สามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์การออกของมะเขือเทศร้อยละ 213 ถึง 275 และยาสูบร้อยละ 259-318 ตามลำดับ

2.4 ต้นทุนการผลิตพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ (ดิเรก, 2550)

2.4.1 ค่าใช้จ่ายลงทุน (ต้นทุน) หมายถึงค่าใช้จ่ายที่เป็นประโยชน์เกินกว่า 1 ปี หรือก่อให้เกิดประโยชน์ในภายหน้าอาจเรียกได้ว่าเป็นสินทรัพย์ที่ใช้ในการผลิต เช่น โรงเรือน ภาชนะปลูก ปิ๊มน้ำ

2.4.2 ค่าใช้จ่ายประจำ หมายถึง ค่าใช้จ่ายที่ก่อให้เกิดรายได้หรือผลประโยชน์ในปีที่ค่าใช้จ่ายเกิดขึ้น ค่าใช้จ่ายนี้จะนำไปหักกับกำไรหรือขาดทุน ประกอบด้วย

1. ต้นทุนคงที่ หมายถึงค่าใช้จ่ายที่เป็นจำนวนคงที่สำหรับปริมาณการผลิตจนถึงระดับหนึ่ง ไม่ว่าปริมาณการผลิตเพิ่มขึ้นหรือลดลงค่าใช้จ่ายประเภทนี้จะคงที่ ได้แก่ ค่าเช่าที่ดิน ค่าเสื่อมราคา

2. ต้นทุนแปรผัน หมายถึงค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงที่สัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณการผลิต ไม่ว่าปริมาณการผลิตเพิ่มขึ้นหรือลดลงค่าใช้จ่ายประเภทนี้คงที่ ได้แก่ ค่าไฟฟ้า ค่าเมล็ดพันธุ์

2.4.3 ผลตอบแทนคือ รายได้จากการจำหน่ายสินค้า

ผลตอบแทน = ราคา \times ปริมาณผลผลิตที่จำหน่าย

2.4.4 กำไรคือ รายได้จากการจากการลงทุนที่หักค่าใช้จ่ายแล้ว

กำไร = ผลตอบแทน - ต้นทุน